

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

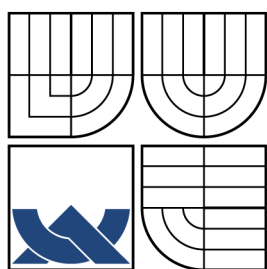
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

HLUKOVÁ ANALÝZA ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ

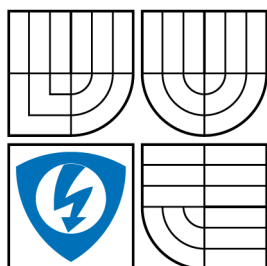
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANÍSA KABAROVÁ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

HLUKOVÁ ANALÝZA ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ NOISE ANALYSIS OF AUDIO SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANÍSA KABAROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Studentka: Mgr. Anisa Kabarová

ID: 133130

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Hluková analýza zvukových signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Realizujte sadu funkcí v prostředí Matlab, které se zvukovým souborem ve formátu wav provedou následující operace: váhování v čase pomocí časových konstant používaných pro měření pomalu a rychle se měnících a impulsních hluků podle normy IEC 61672, váhování v kmitočtu pomocí váhových filtrů A a C podle normy IEC 61672 a statistickou analýzu měření (pravděpodobnostní hladiny, ekvivalentní hladina, maximum/minimum, hluková expozice). Dále realizujte jednoduché grafické uživatelské rozhraní pro tyto funkce, které umožní načtení zvukových souborů pro zpracování, kalibraci hladiny akustického tlaku, volbu veličiny, která má být ze zvukového souboru vypočtena, a zobrazení výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Smetana, C. a kol., Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha 1998. ISBN: 80-901936-2-5
- [2] Schimmel, J., Elektroakustika. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-167. ISBN 978-80-214-4716-5
- [3] Doňar, B., Zaplatílek, K., MATLAB pro začátečníky, 1. díl. Ben, technická literatura, Praha. ISBN: 80-7300-175-6
- [4] ČSN EN 61672-1: Elektroakustika – Zvukoměry – Část 1: Technické požadavky. Česká technická norma, Český normalizační institut, listopad 2003.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

V teoretické části této práce jsou shrnuty základní pojmy a veličiny spojené s měřením hluku a jeho statistickou analýzou. Praktická část práce je zaměřena na implementaci kmitočtové a časové filtrace podle technické normy IEC 61672 a statistické analýzy měření v programovacím prostředí MATLAB. Na závěr je vytvořená aplikace otestována na reálných datech a výsledky měření jsou srovnány s výsledky naměřenými digitálním hlukoměrem.

KLÍČOVÁ SLOVA

akustika, měření hluku, zvukoměr, váhování v kmitočtu, váhování v čase, statistická analýza, ekvivalentní hladina, zvuková expozice

ABSTRACT

The theoretical part of this work deals with the basics of acoustics, noise measurement and statistical noise level analysis. The application part focuses on the implementation of the frequency and time weighting according to the technical standard IEC 61672 and the statistical noise level analysis in MATLAB programming environment. Finally the reliability of the application is tested on real data and the results are compared to those measured by a digital Sound Level Meter.

KEYWORDS

acoustics, noise measurement, sound level meter, time weighting, frequency weighting, statistical analysis, equivalent sound level, sound exposure

KABAROVÁ, Anísa *Hluková analýza zvukových signálů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 36 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Hluková analýza zvukových signálů“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za přínosné rady, konzultace a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Akustika - základní pojmy a veličiny	12
1.1 Zvuk a šíření zvuku	12
1.2 Základní veličiny zvukového pole	13
1.2.1 Akustický tlak	13
1.2.2 Akustický výkon	13
1.2.3 Intenzita zvuku	13
1.3 Fyziologická akustika	13
2 Hluk a jeho měření	15
2.1 Stupnice a jednotky pro měření hluku	15
2.2 Hladina akustického tlaku	15
2.3 Sčítání hladin akustického tlaku	15
2.4 Zvukoměry	16
2.4.1 Oktávové a třetinooktávové filtry	17
2.4.2 Váhování v kmitočtu – váhové filtry	18
2.4.3 Váhování v čase	19
2.5 Statistická analýza měření	20
2.5.1 Ekvivalentní hladina akustického tlaku	21
2.5.2 Pravděpodobnostní hladiny	21
2.5.3 Hluková expozice	22
3 Praktická část – aplikace v MATLABu	23
3.1 Váhování v kmitočtu	23
3.2 Váhování v čase	24
3.3 Kalibrace hladiny akustického tlaku	25
3.4 Statistická analýza měření	26
3.5 Grafické uživatelské rozhraní	28
4 Diskuze výsledků měření	31
5 Závěr	33
Literatura	34
Seznam příloh	35

A	Obsah elektronické přílohy	36
A.1	Seznam přiložených souborů	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření zvuku v plynném prostředí kruhovým vlněním [6].	12
2.1	Blokové schéma analogového zvukoměru [6].	16
2.2	Křivky stejné hlasitosti [6].	18
2.3	Modulové kmitočtové charakteristiky váhových filtrů A a C [6].	19
2.4	Základní kroky při vytváření exponenciálně časově vážené hladiny akustického tlaku [3].	20
2.5	Histogram a distribuční funkce [8].	21
3.1	Časový průběh signálu po kmitočtové filtraci (filtry A a C)	24
3.2	Vstupní a výstupní signál při časových konstantách Slow, Fast a Im- pulse (aktuator.wav)	25
3.3	Grafické rozhraní aplikace	28
3.4	Vývojový diagram aplikace	30

SEZNAM TABULEK

2.1	Střední kmitočty třetinooktávových pásem [Hz] [6]	17
4.1	Srovnání výsledků měření aplikací v MATLABu a digitálním hlukoměrem XL2 NTI	31

ÚVOD

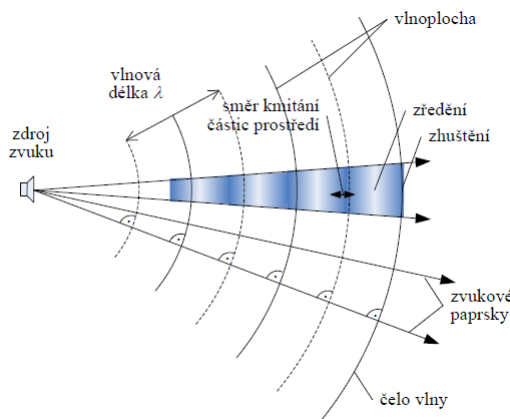
Hluk patří mezi faktory, které mohou nepříznivě ovlivňovat pracovní výkonnost a mít trvalé následky na lidské zdraví. S rozvojem techniky a s rostoucí hlučností okolního prostředí vznikla proto potřeba nadměrný hluk regulovat a upravit zákonnými předpisy a normami, které stanovují maximální přípustné hladiny hluku a způsoby, jakými jsou tyto hladiny měřeny. V prvních dvou kapitolách této práce se seznámíme se základními pojmy a veličinami užívanými v akustice a teorii měření hluku tak, jak jsou definovány v odborné literatuře a v příslušných technických normách. Představíme si také základní schéma a funkce zvukoměru a veličiny používané při statistické analýze měření hluku. Třetí část bude zaměřena na implementaci časové a kmitočtové filtrace a statistické analýzy zvukových signálů v programovacím prostředí MATLAB. V poslední kapitole pak budou srovnány hodnoty naměřené vytvořenou aplikací a hodnoty naměřené digitálním hlukoměrem NTI XL2.

1 AKUSTIKA - ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY

V této a následující kapitole jsou shrnuty základní pojmy a veličiny z oblasti teorie zvuku, fyziologické akustiky, hluku a jeho měření. Obě kapitoly vychází především z následující literatury: [1], [6], [8] a [9].

1.1 Zvuk a šíření zvuku

Zvuk můžeme definovat jako mechanické kmitání částic plynů, kapalin nebo pružných pevných látek, které se šíří ve vlnoplochách v závislosti na fyzikálních vlastnostech prostředí. Šíření zvuku je spojeno s přenosem energie. Prostor, kterým se šíří zvuk, se nazývá zvukové pole. Při kmitání částic prostředí se vytváří místa s relativním zhuštěním nebo zředěním částic tohoto prostředí. Změna hustoty prostředí vytvořená kmitáním částic prostředí se nazývá zvuková vlna. Plocha, kam dospěje zvuková vlna od svého zdroje za stejný čas, se nazývá vlnoplocha. Rychlost, kterou se šíří zvukové vlny prostředím, se nazývá rychlost šíření zvuku. Při normální teplotě $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a normálním atmosférickém tlaku $p_0 = 101,3\text{ kPa}$ je rychlost zvuku zhruba 343 m/s [8].



Obr. 1.1: Šíření zvuku v plynném prostředí kruhovým vlněním [6].

1.2 Základní veličiny zvukového pole

1.2.1 Akustický tlak

Akustický tlak je definován jako rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole za přítomnosti zvuku a statickou hodnotou barometrického tlaku $p_{00} = 10^5$ Pa. Tlak je skalární veličina, kterou definujeme jako sílu působící na jednotku plochy [6]:

$$p(t) = F(t)/S. \quad (1.1)$$

Jednotkou tlaku je Pascal ($1 \text{ Pa} = \text{N/m}^2$). Minimální hodnota akustického tlaku, kterou lze zachytit lidským sluchem, je $20 \text{ } \mu\text{Pa}$ (tzv. prahový nebo referenční akustický tlak) v okolí kmitočtu 1 kHz .

1.2.2 Akustický výkon

Akustický výkon je možné definovat jako mechanický výkon (práci vykonanou za jednotku času) vyjádřený pomocí akustických veličin. Lze jej vyjádřit vztahem

$$W = p \cdot v \cdot S, \quad (1.2)$$

kde p je akustický tlak, v akustická rychlost a S plocha, na kterou rovnoměrně působí akustický tlak. Jednotkou akustického výkonu je Watt. Referenční hodnota je $1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$.

1.2.3 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku označuje střední hodnotu zvukové energie, která projde za jednotku času přes jednotkovou plochu kolmou na směr šíření zvukového vlnění

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt. \quad (1.3)$$

Jednotkou akustického výkonu je W/m^2 . Referenční hodnotou je $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

1.3 Fyziologická akustika

Vnímání zvuku je složitý fyziologický a psychologický proces. Sluchový orgán má nelineární vlastnosti pro všechny veličiny, kterými můžeme hluk popsat, měření a hodnocení hluku je proto relativně složité [8]. Vztah mezi subjektivním vjemem a vnějším podnětem vyjadřuje tzv. Weber-Fechnerův zákon. Podle něj člověk vnímá vnější fyzikální podněty, které rostou geometrickou řadou jako řadou aritmetickou,

velikost vjemu je tedy úměrná logaritmu intenzity podnětu. Weber-Fechnerův zákon lze matematicky popsat následujícím vztahem [6]:

$$R = c \log S + a, \tag{1.4}$$

kde R je velikost vjemu, c a a jsou konstanty a S je velikost podnětu. Lidský sluch je schopen vnímat zvuky v kmitočtovém rozsahu 20 Hz a 20 kHz. Největší citlivost sluchu je v okolí 2 až 3 kHz. Signály s kmitočty do 20 Hz se nazývají infrazvukové, s kmitočtem nad 20 kHz pak ultrazvukové.

2 HLUK A JEHO MĚŘENÍ

Pojmem hluk označujeme zvuk, který je vnímán jako škodlivý, rušivý, nepříjemný a který vyvolává biologickou reakci člověka nebo jiných živočichů [6].

2.1 Stupnice a jednotky pro měření hluku

Vzhledem ke způsobu, jakým lidské ucho vnímá zvuk (viz Weber-Fechnerův zákon), je pro popis akustických veličin vhodné použít logaritmické měřítko. V technické praxi se proto obvykle pracuje s decibelovými veličinami, které převádějí základní akustické veličiny na decibelové hladiny na základě jejich referenčních hodnot. Decibelové veličiny se také používají z důvodu větší názornosti: např. v případě akustického tlaku představuje rozsah měřených tlaků (mezi prahem slyšitelnosti a prahem bolesti) rozdíl několika řádů - $20 \mu\text{Pa}$ až 20 Pa , ekvivalentní rozsah hladin akustického tlaku v decibelech je ale významně menší (0 až 120 dB) [9].

2.2 Hladina akustického tlaku

Hladina akustického tlaku je definována vztahem

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} [\text{dB}], \quad (2.1)$$

kde p je efektivní hodnota akustického tlaku (v Pa) a p_0 je referenční hodnota akustického tlaku. V anglicky psané literatuře se pro označení hladiny akustického tlaku používá zkratka SPL (Sound Pressure Level). Jednotka hladiny akustického tlaku se pak často označuje pomocí SPL v dolním indexu nebo v závorce. Z rovnice vyplývá, že výsledná hladina akustického tlaku pro dva zdroje zvuku se stejnou hladinou akustického tlaku je o 3 dB vyšší a pro N stejných zdrojů je vyšší o $10 \log N$ [6]. Za škodlivý se považuje hluk dosahující hladiny akustického tlaku 85 dB a více. Bolest ve sluchovém orgánu se pociťuje při 120 dB, při 160 dB dochází k protržení bubínku. Nepříjemné pocity se ale mohou dostavovat i při velmi nízkých hladinách akustického tlaku, příjemně se člověk cítí až při hladině okolo 30 dB [1].

2.3 Sčítání hladin akustického tlaku

Hladiny akustického tlaku více zdrojů zvukového signálu se sčítají výkonově, výsledná akustická intenzita je dána součtem dílčích intenzit, tj. součtu druhých mocnin dílčích akustických tlaků. Pro výslednou hladinu akustického tlaku L_c platí vztah [6]

$$L_c = 10 \log(\sum_{i=1}^N 10^{L_i/10}) [dB_{SPL}], \quad (2.2)$$

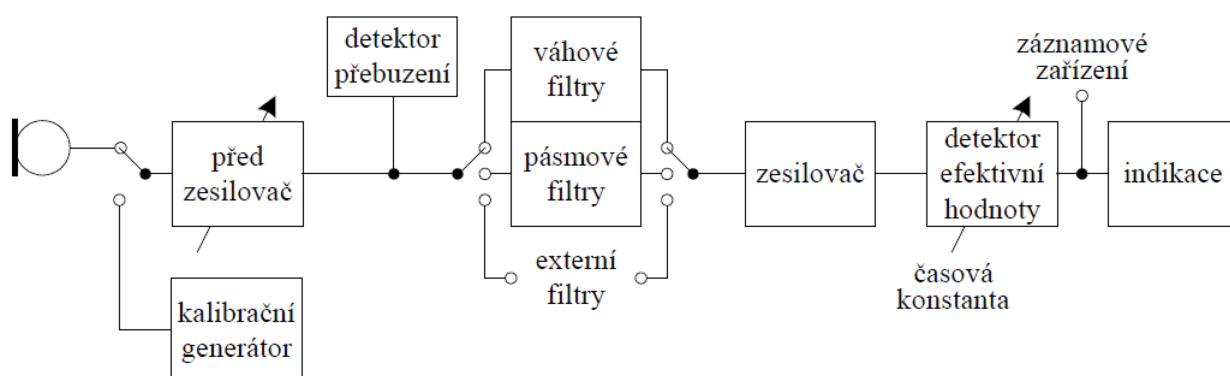
kde N je počet zdrojů zvuku a L_i hladiny jimi vytvořených akustických tlaků.

2.4 Zvukoměry

Hluk lze měřit dvěma základními způsoby [1]:

- měřením hladin zvuku na základě měření skalární veličiny akustického tlaku
- vektorovou veličinou akustické intenzity (tato metoda má tu výhodu, že na rozdíl od měření hladin zvuku nezáleží na vzdálenosti od zdroje ani na vlivu okolí).

V této práci se ale budeme zabývat pouze první metodou. Základním měřicím přístrojem k měření hladin zvuku je zvukoměr (v anglicky psané literatuře označován jako SLM – Sound Level Meter), analogové nebo digitální přesné elektrické zařízení, které reaguje na zvuk podobně jako lidský sluch. Blokové schéma zvukoměru 2.1 obsahuje snímací prvek (nejčastěji kondenzátorový mikrofon), který umožňuje převádět efektivní hodnoty měřeného výstupního napětí na hodnotu hladiny akustického tlaku. Dále obsahuje pomocné obvody, které umožňují měření různých typů hluků a přímé měření a odečet hladiny zvuku, ekvivalentní hladiny akustického tlaku, atd. Většina zvukoměrů obsahuje oktávové a třetinooktávové filtry (nebo umožňuje jejich externí připojení) pro měření veličin zvukového pole v kmitočtových pásmech. Vlastnosti zvukoměrů jsou normalizovány a jsou stanoveny limitní tolerance, aby bylo možné naměřené veličiny srovnávat a měření reprodukovat [6].



Obr. 2.1: Blokové schéma analogového zvukoměru [6].

2.4.1 Oktávové a třetinooktávové filtry

Vlastnosti akustických veličin jsou obecně závislé na frekvenci f . Pokud by se ale měřila frekvenční spektra s krokem $\Delta f = 1$ Hz, tak by bylo jejich vytvoření příliš komplikované. Pro zjednodušení se proto v praxi zavádějí kmitočtová pásma o konstantní šířce [9]. V akustice se nejčastěji využívá měření v oktávových a třetinooktávových pásmech. Pro zjištění efektivní hodnoty akustického tlaku v určitém kmitočtovém pásmu je pak měřený signál filtrován bankou pásmových filtrů, jejichž střední kmitočet f_S a šířka pásma B rostou logaritmicky (viz Weber-Fechnerův zákon). Tento způsob měření se označuje jako analýza v kmitočtových pásmech s konstantní relativní šířkou (Constant Percentage Bandwidth, CPB). Hladina akustického tlaku naměřeného v určitém kmitočtovém pásmu se pak označuje $L_{\Delta f}$:

$$L_{\Delta f} = 20 \log \frac{p_{\Delta f}}{p_0} [dB_{SPL}], \quad (2.3)$$

kde $p_{\Delta f}$ je efektivní hodnota akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu (po filtraci signálu).

Oktávový filtr definujeme jako pásmový filtr, který má jmenovitý poměr horního a dolního mezního kmitočtu roven 2 [3]. Kmitočtový rozsah slyšitelnosti lidského sluchu tak lze rozdělit na zhruba deset oktávových pásem.

U oktávové banky filtrů platí, že

$$f_{S_{i+1}} = 2f_{S_i}, B_{i+1} = 2B_i, f_{D_i} = f_{S_i}/\sqrt{2}, f_{H_i} = f_{S_i}\sqrt{2}, \quad (2.4)$$

kde f_S je střední kmitočet pásma, f_D a f_H jsou dolní a horní mezní kmitočet pásma a index i značí pořadí pásma.

Třetinooktávový filtr lze pak definovat jako pásmový filtr, který má jmenovitý poměr horního a dolního mezního kmitočtu roven $\sqrt[6]{2}$ [4].

Analogicky pro ně platí, že

$$f_{S_{i+1}} = \sqrt[3]{2}f_{S_i}, B_{i+1} = \sqrt[3]{2}B_i, f_{D_i} = f_{S_i}/\sqrt[6]{2}, f_{H_i} = f_{S_i}\sqrt[6]{2}. \quad (2.5)$$

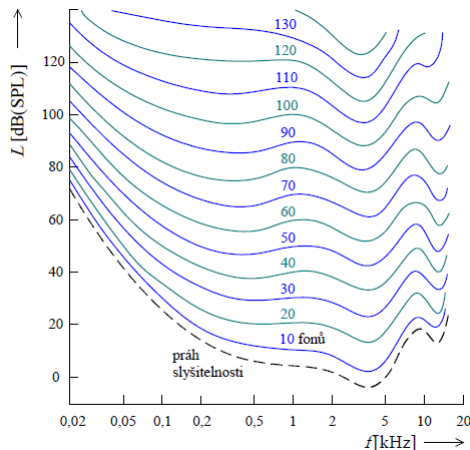
V tabulce 2.1 jsou uvedeny střední kmitočty třetinooktávových pásem, prostřední řádek odpovídá středním kmitočtům oktávových pásem:

Tab. 2.1: Střední kmitočty třetinooktávových pásem [Hz] [6]

25	50	100	200	400	800	1600	3150	6300	12500
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
40	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000	20000

2.4.2 Váhování v kmitočtu – váhové filtry

Váhové filtry se zavádějí z důvodu nestejné citlivosti lidského sluchu při různých kmitočtech. Slouží k přepočtení naměřené hodnoty hladiny zvuku na hladinu zvuku tak, jak ji vnímá lidský sluch [9]. Váhové funkce jsou odvozeny od tzv. hladin hlasitosti, které udávají jaký akustický tlak způsobí na různých kmitočtech stejný vjem hlasitosti jako referenční tón s kmitočtem 1 kHz. Jednotkou hladiny hlasitosti je fon [Ph].



Obr. 2.2: Křivky stejné hlasitosti [6].

Kmitočtové charakteristiky váhových filtrů jsou korekční křivky, které se sčítají s naměřeným spektrem signálu, a jsou proto inverzní ke křivkám stejné hlasitosti [6].

V praxi se nejčastěji používají filtry A a C. Kmitočtová charakteristika váhového filtru typu A je inverzní ke křivce hlasitosti 40 Ph (100 Ph pro váhový filtr typu C).

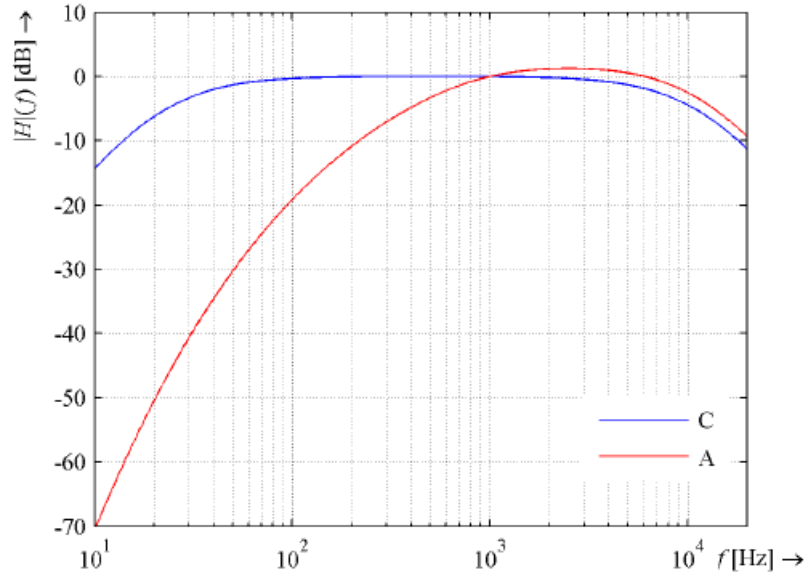
Kmitočtová charakteristika váhové funkce C se realizuje pomocí dvou pólů na nízkém kmitočtu f_1 , dvou pólů na vysokém kmitočtu f_4 a dvou nul na 0 Hz. Kmitočtová charakteristika váhové funkce A se realizuje tak, že se kmitočtová charakteristika váhové funkce C doplní o dvě vázané hornofrekvenční propusti prvního řádu [3].

Váhová funkce $C(f)$ v decibelech se vypočítá z rovnice

$$C(f) = 20 \log \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000}. \quad (2.6)$$

Váhová funkce $A(f)$ se vypočítá z rovnice

$$A(f) = 20 \log \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2}(f^2 + f_3^2)^{1/2}(f^2 + f_4^2)} \right] - A_{1000}. \quad (2.7)$$



Obr. 2.3: Modulové kmitočtové charakteristiky váhových filtrů A a C [6].

C_{1000} a A_{1000} jsou normující konstanty v decibelech reprezentující elektrický zisk potřebný k tomu, aby kmitočtové funkce měly zisk 0 dB (a tedy nulovou korekci) na 1 kHz. Aproximované hodnoty kmitočtů f_1 až f_4 jsou $f_1 = 20,60$ Hz, $f_2 = 107,7$ Hz, $f_3 = 737,9$ Hz a $f_4 = 12194$ Hz. Normující konstanty C_{1000} a A_{1000} zaokrouhlené na 0,001 dB jsou -0,062 dB a -2,000 dB [3].

Pokud měříme hladinu akustického tlaku po filtraci váhovým filtrem, označujeme změřenou veličinu jako hladinu zvuku a index veličiny a její jednotku doplníme o písmeno označující typ použitého váhového filtru [6]:

$$L_A = 20 \log \frac{p_A}{p_0} [dB(A)]. \quad (2.8)$$

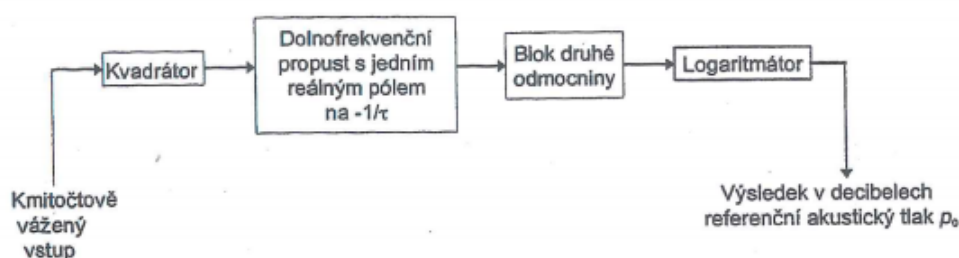
2.4.3 Váhování v čase

V praxi dochází ke kolísání hladiny akustického tlaku v závislosti na čase. Z hlediska této závislosti lze rozlišit následující druhy hluku [6]:

- časově neproměnné (stacionární, ustálené) – hladina akustického tlaku se v daném časovém intervalu nemění o více než 5 dB, hodnoty určujících veličin jsou na čase nezávislé.
- krátkodobě časově proměnné - hladina akustického tlaku se v daném časovém intervalu mění o více než 5 dB, je charakterizovaný maximálními hodnotami sledovaných veličin

- impulsní – hluk, který se v krátkých časových okamžicích náhle mění, dochází u něj ke skokovému nárazu a následnému rychlému poklesu akustického tlaku

Různé druhy hluků je třeba také různě měřit a hodnotit. Vychází se zde z vlastnosti lidského sluchu, který vnímá subjektivně stejně intenzivní signál odlišně v závislosti na době působení signálu [8]. U zvukoměrů k tomu slouží tzv. váhové charakteristiky, které se definují jako exponenciální funkce se stanovenou časovou konstantou, kterou se mění kvadrát okamžitého akustického tlaku. Ve zvukoměru se časová váhová funkce realizuje jako dolní propust 1. řádu [3]:



Obr. 2.4: Základní kroky při vytváření exponenciálně časově vážené hladiny akustického tlaku [3].

Podle charakteru hluku, který měříme, pak používáme odlišné časové konstanty zvukoměru:

- pro stacionární hluky používáme časovou konstantu Slow: $\tau = 1$ s
- pro krátkodobě časově proměnné hluky používáme časovou konstantu Fast: $\tau = 125$ ms
- pro impulsní hluky používáme časovou konstantu Impulse: $\tau = 35$ ms pro dobu náběhu a $\tau = 1,5$ s pro dobu poklesu

2.5 Statistická analýza měření

Vzhledem k tomu, že hodnoty hladin běžných hluků fluktuují, je vhodné naměřené hodnoty zpracovávat jako náhodnou proměnnou a k jejich analýze použít statistické metody [8]. Hodnoty je třeba odečítat v pravidelných intervalech a v dostatečně dlouhém časovém úseku. Mezi základní veličiny používané při statistické analýze patří ekvivalentní hladina akustického tlaku, pravděpodobnostní hladiny a hluková expozice.

2.5.1 Ekvivalentní hladina akustického tlaku

Ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{eq} popisuje střední hodnotu hladiny akustického tlaku změřeného v určitém časovém intervalu T . Lze ji vyjádřit vztahem[6]:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt [dB_{SPL}], \quad (2.9)$$

kde T je doba trvání proměnného hluku, p okamžitá hodnota akustického tlaku a p_0 referenční hodnota akustického tlaku. Ekvivalentní hladina zvuku A je definována jako:

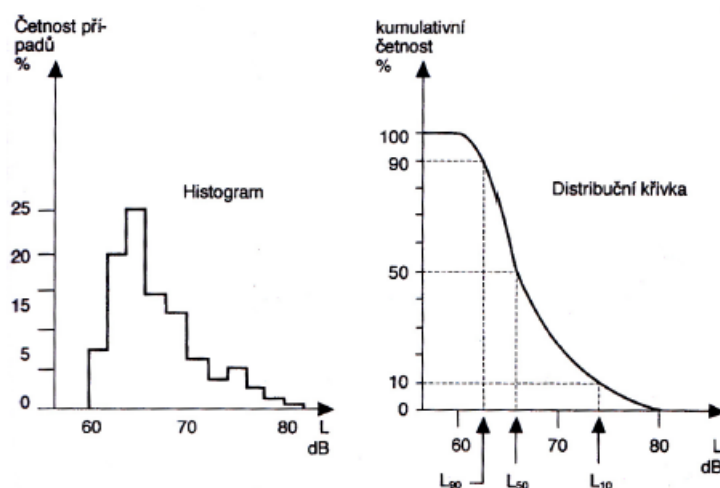
$$L_{eqA} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)A/10} dt [dB(A)]. \quad (2.10)$$

2.5.2 Pravděpodobnostní hladiny

Z průběhu časově proměnné hladiny akustického tlaku lze také zjistit maximální a minimální hladinu akustického tlaku (L_{max} a L_{min}) naměřené na daném místě. Další veličiny lze určit z histogramu a distribuční funkce. Histogram zobrazuje, kolikrát se vyskytla hodnota sledované veličiny v průběhu měření. Distribuční funkce $F(x,t)$ náhodného procesu $\xi(t)$ je definována jako

$$F(x, t) = P\{\xi(t) < x\}, \quad (2.11)$$

kde $P\{\xi(t) < x\}$ označuje pravděpodobnost toho, že náhodný proces $\xi(t)$ v okamžiku t nabude menší hodnoty než x .



Obr. 2.5: Histogram a distribuční funkce [8].

Vzhledem k tomu, že při měření hluku nás naopak zajímá, v kolika případech byla změřená hladina zvuku vyšší než daná hladina, je zde distribuční funkce definována jako:

$$F(L_N, t) = P\{L_{eqA}(t) > L_N\}, \quad (2.12)$$

kde L_N je pravděpodobnostní hladina definována jako hladina zvuku A překročená v N procentech za celou dobu měření. Hladina L_{10} tak označuje hladinu zvuku překročenou v 10% případů za dobu měření. Takto definovaná distribuční funkce má klesající průběh [6].

2.5.3 Hluková expozice

Hluková expozice označuje míru dlouhodobého vystavení lidského sluchu hlukům. Měří se zvukovým expozimetrem, který vyčísľuje hlukovou expozici vzorkováním hodnot hladin akustického tlaku v pravidelných intervalech. Pro osmihodinovou hlukovou expozici je hranice mezi vratnými a nevratnými změnami pro lidský sluch $L_{Aeq} = 85$ dB(A).

Hluková zátěž $E_{A,T}$ je definována jako [6]:

$$E_{A,T} = \int_0^T p_A^2(t) dt = p_{Aeq}^2 T [\text{Pa}^2 \text{s}] [\text{Pa}^2 \text{h}], \quad (2.13)$$

kde $p_A(t)$ je efektivní hladina akustického tlaku v Pa váženého filtrem A, T je časový interval, na který se vztahuje hodnota zvukové expozice a p_{Aeq} je ekvivalentní akustický tlak za dobu T . Hluková zátěž může být vyjádřena v procentech, kde 100 % odpovídá 1 Pa²h. Tato hluková zátěž odpovídá osmihodinové hlukové expozici při $L_{Aeq} = 85$ dB(A) [6]:

$$E_{A,8} = p_{Aeq}^2 T = (2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{85/20})^2 \cdot 8 \cong 1 \text{ Pa}^2 \text{h}. \quad (2.14)$$

3 PRAKTICKÁ ČÁST – APLIKACE V MATLABU

V předchozí kapitole byly popsány základní funkce zvukoměru a veličiny používané při statistické analýze zvukových signálů. Předmětem této kapitoly je popis implementace kmitočtové a časové filtrace a statistické analýzy zvukových signálů v programovacím prostředí MATLAB. Použita byla verze MATLAB 8.1 (R2013a). Funkce váhování v kmitočtu a váhování v čase byly otestovány na zvukovém souboru **aktuator.wav**, který zachycuje pracovní cyklus aktuátoru a obsahuje všechny tři základní druhy hluků – pomalé, rychlé a impulsní. Nahrávka byla pořízena vedoucím práce ve zvukových laboratořích Ústavu telekomunikací FEKT VUT.

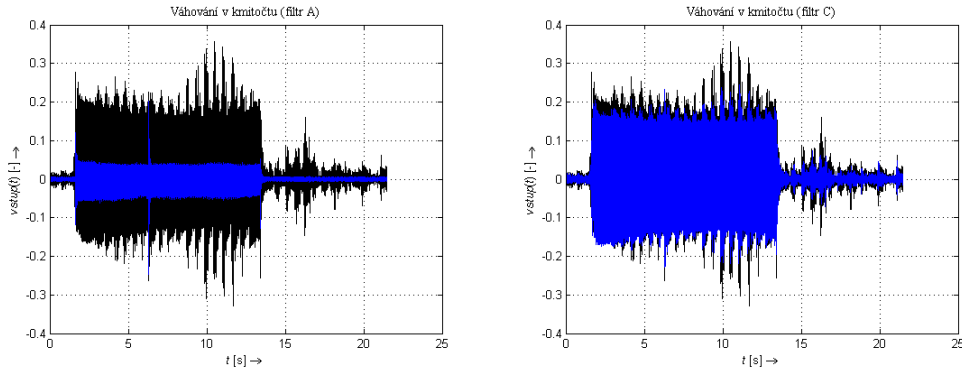
3.1 Váhování v kmitočtu

Tuto funkci realizují soubory **adsgn.m** a **cdsgn.m**. Autorem těchto funkcí je Christophe Couvreur a jsou k dispozici na stránkách www.mathworks.com [2]. Váhování v kmitočtu se realizuje pomocí filtrů, jejichž parametry jsou definovány v normě [3]. Hodnoty kmitočtů f_1 až f_4 a normujících konstant C_{1000} a A_{1000} byly ve funkcích Christopa Couvreura upraveny podle normy ČSN 61672-1 [3]. Koeficienty B (proměnná NUMs) a A (proměnná DENs), kterými je signál filtrován, jsou číselníky a jmenovatel přenosové funkce. Vstupní signál se převádí na výstupní pomocí funkce konvoluce. Funkcí **bilinear** se převádí analogový signál na digitální.

Níže uvádíme nejdůležitější část kódu váhové funkce A (funkce C je tvořena analogicky):

```
% definice analogoveho vahoveho filtru A podle
%normy CSN 61672-1
f1 = 20.60;
f2 = 107.7;
f3 = 737.9;
f4 = 12194;
A1000 = 2.000;
pi = 3.1416;
NUMs = [(2*pi*f4)^2*(10^(A1000/20)) 0 0 0 0];
DENs = conv([1+4*pi*f4 (2*pi*f4)^2],[1 +4*pi*f1 (2*pi*f1)^2]);
DENs = conv(conv(DENs,[1 2*pi*f3]),[1 2*pi*f2]);
% bilinearni transformace analogoveho filtru na digitalni
[B,A] = bilinear(NUMs,DENs,fs);
```


Kmitočtovou filtrací signálu jsme získali následující charakteristiky (signál po kmitočtové filtraci je značen modře, vstupní černě):



Obr. 3.1: Časový průběh signálu po kmitočtové filtraci (filtry A a C)

3.2 Váhování v čase

Časovou filtraci provádí funkce `time_weighting.m`. Tato funkce a funkce pro výpočet pravděpodobnostních hladin byly vytvořeny s použitím skriptů, jejichž autorem je vedoucí této práce. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, váhování v čase se realizuje jako dolní propust prvního řádu s nízkým mezním kmitočtem, která umožňuje potlačit rychlé změny v signálu a filtrovat signály v slyšitelné oblasti. Mezní kmitočty propusti se rovnají převráceným hodnotám časových váhových konstant. V MATLABu se bude příslušná funkce realizovat jako Z transformace exponenciální funkce váhování v čase. Výstupem funkce jsou koeficienty potřebné pro filtraci signálu.

Obecná rovnice pro přenosovou funkci číslicového systému je:

$$H = \frac{Y(z)}{D(z)}, \quad (3.1)$$

kde $D(z)$ je vstupní a $Y(z)$ filtrovaný signál.

Vztah pro výstupní signál dolní propusti prvního řádu je pak:

$$Y(z) = (1 - g)D(z) + gY(z).z^{-1}. \quad (3.2)$$

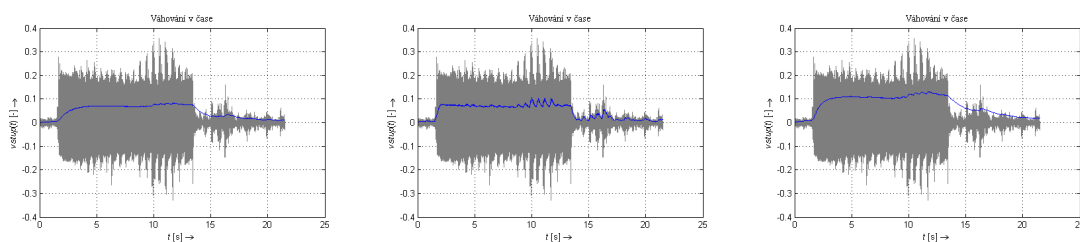
Níže uvádíme nejdůležitější část kódu funkce `time_weighting.m`:

```

% funkce vahovani v case
function y=time_weighting (type)
...
%exponenciální funkce pro vahove konstanty F, S a I
gF=exp(-1./(fs.*tauF));
gS=exp(-1./(fs.*tauS));
gIa=exp(-1./(fs.*tauIa));
gIr=exp(-1./(fs.*tauIr));
.....
%Z transformace exponencialni funkce vahovani v case
% (vztah pro vystupni signal dolni propusti 1. radu)
y(n)=(1-g).*d(n)+g.*y(n-1);

```

Filtrací signálu různými časovými váhovými koeficienty jsme získali následující charakteristiky (signál po časové filtraci je značen modře, vstupní šedě):



Obr. 3.2: Vstupní a výstupní signál při časových konstantách Slow, Fast a Impulse (aktuator.wav)

Z grafů lze vidět, že průběhy charakteristik odpovídají teoretickým předpokladům: časová konstanta Slow se vyznačuje pomalým náběhem a poklesem, časová konstanta Fast rychlým náběhem a poklesem a časová konstanta Impulse rychlým náběhem a pomalým poklesem. Graf signálu po časové filtraci znázorňuje vývoj efektivní hodnoty signálu v čase.

3.3 Kalibrace hladiny akustického tlaku

Před časovou a kmitočtovou filtrací signálu je třeba provést kalibraci hladiny akustického tlaku. To znamená, že je třeba zjistit, jaká hodnota vzorkovaného signálu odpovídá jednotce akustického tlaku 1 Pa. Ke kalibraci zvukoměru se používá tzv. tónový kalibrátor, který generuje tón o kmitočtu 1 kHz se známou hladinou akustického tlaku - nejčastěji 94 dB [6], což odpovídá akustickému tlaku o velikosti 1 Pa.

Výpočet kalibrační konstanty je realizován funkcí `calibration.m`, která provede načtení kalibračního souboru, navzorkování signálu a vypočítá jeho efektivní hodnotu. Velikost kalibrační konstanty je pak rovna převrácené hodnotě této efektivní hodnoty.

```
%funkce pro vypocet kalibracni konstanty (pref)
function pref=calibration
...
%vypocet efektivni hodnoty signalu
rms=sqrt(sum(x.^2)/N);
%vypocet kalibracni konstanty
pref=1/rms;
```

3.4 Statistická analýza měření

Výpočet statistických veličin (ekvivalentní hladiny, hlukové expozice, maxima/minima a pravděpodobnostních hladin) je realizován pomocí těchto funkcí: `leq.m`, `sound_exposure.m` a `probability_level.m`. Všechny tyto funkce provedou postupně načtení souboru, navzorkování signálu, vynásobení kalibrační konstantou (pokud je zadána jako vstupní parametr), kmitočtovou a časovou filtraci a nakonec výpočet dané veličiny. Vzhledem k tomu, že trvá několik vteřin, než se časový filtr ustálí, není prvních pět vteřin zvukového souboru ve výpočtu veličin zohledněno. Výpočet ekvivalentní hladiny akustického tlaku a hlukové expozice vychází ze vztahů 2.9 a 2.13. Všechny tři funkce mají jako vstupní parametry kmitočtovou filtraci (*fw*), časovou filtraci (*tw*) a kalibrační konstantu (*pref*) a volají ve svém rámci funkce pro váhování v kmitočtu a v čase. Pokud kalibrační konstanta není zadána, je její hodnota automaticky nastavena jako rovna 1. Funkce `probability_level.m` má navíc jako vstupní parametr index hledané pravděpodobnostní hladiny (*Lp*).

```
function leq(fw,tw,pref)
....
%vypocet ekvivalentni hladiny akustického tlaku
leq = 10*log10(sum(z.^2)/N/(2e-5).^2);
```

```
function sound_exposure(fw,tw,pref)
....
%vypocet hlukove expozice
E = sum(z.^2);
```

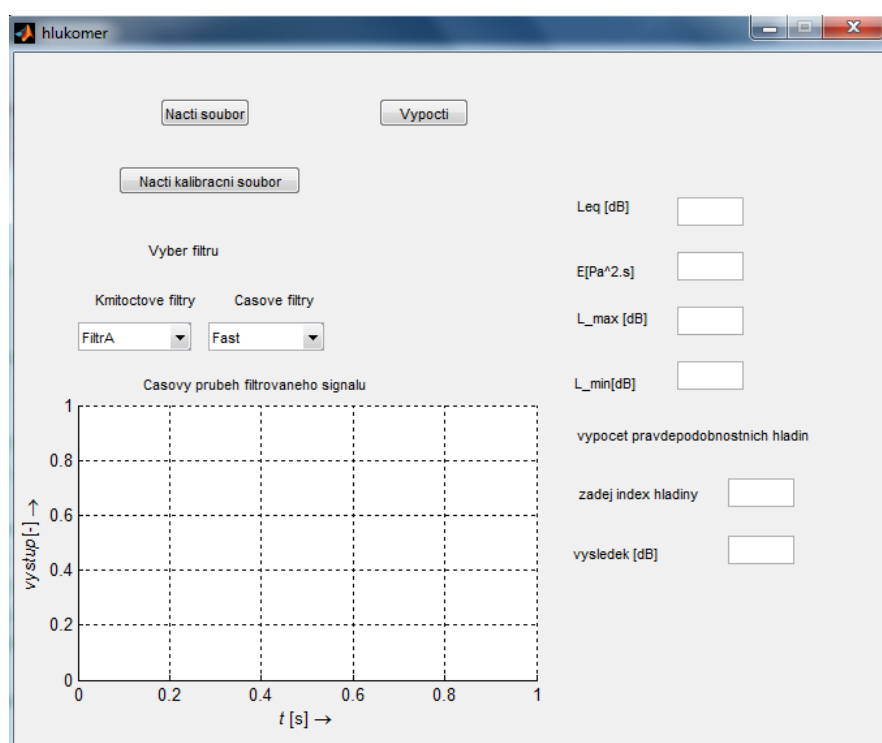
Maximum, minimum a pravděpodobnostní hladiny jsou vypočítány pomocí funkce `probability_level.m`. Po navzorkování a filtraci signálu jsou nejprve vypočítány hodnoty hladin akustického tlaku, které jsou uloženy do vektoru **L**. Vzorec pro výpočet hladin akustického tlaku vychází ze vztahu 2.1. Následně je vypočítána maximální a minimální hladina akustického tlaku měřeného zvukového signálu. Pomocí funkce `linspace` je vytvořen z vektoru **L** vektor **v** o 1000 prvcích, které jsou rovnoměrně lineárně rozprostřeny mezi minimální a maximální hodnotou hladiny akustického tlaku. Dále je vygenerován vektor indexů **F**, který má stejný počet prvků jako vektor **v**. Pomocí funkce `find` následně ve vektoru **F** hledáme index (=vstupní parametr L_p) odpovídající hledanému percentilu pravděpodobnostní hladiny. Její hodnota se pak rovná prvku se stejným indexem ve vektoru **v**.

```
function probability_level(fw,tw,pref,Lp)
....
%vypocet hladin akustickeho tlaku
L = 20*log10(z1./2e-5);
%vypocet maximalni a minimalni hladiny
max_L=max(L);
min_L=min(L);
%vypocet pravdepodobnostni hladiny
v = linspace(min_L,max_L,1000);
F = zeros(1,length(v));
for t=1:length(F),
    F(t) = length(find(L>v(t)));
end;
F = F./length(L);
L_prob = v(find(F<=(Lp/100),1));
```

3.5 Grafické uživatelské rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní (GUI) bylo v MATLABu vytvořeno pomocí nástroje GUIDE. Aplikaci spustíme zadáním příkazu `hlukomer` z příkazového řádku v pracovním prostředí MATLABu. Spolu s grafickým rozhraním `hlukomer.fig` a zdrojovým kódem aplikace `hlukomer.m` je třeba, aby ve stejném adresáři byly uloženy soubory `adsgn.m` a `cdsgn.m`, které jsou zdrojovým kódem aplikace volány. Po zadání příkazu se zobrazí okno aplikace 3.3, které obsahuje následující prvky:

- tlačítka pro načtení měřeného a kalibračního souboru („Nacti soubor” a „Nacti kalibracni soubor”) a spuštění výpočtu a vykreslení grafu („Vypocti”)
- rozbalovací menu pro výběr kmitočtového filtru - volit lze mezi filtrem A, filtrem C a filtrem Z (= tzv. nulový „zero” filtr)
- rozbalovací menu pro výběr časového filtru - volit lze mezi časovými konstantami Fast, Slow a Impulse
- pole pro vykreslení časového průběhu signálu po kmitočtové a časové filtraci
- editační pole pro zadání indexu pravděpodobnostní hladiny
- editační pole pro zobrazení výsledku výpočtu jednotlivých statistických veličin - ekvivalentní hladiny akustického tlaku, hlukové expozice, maxima a minima a pravděpodobnostní hladiny pro zadaný index

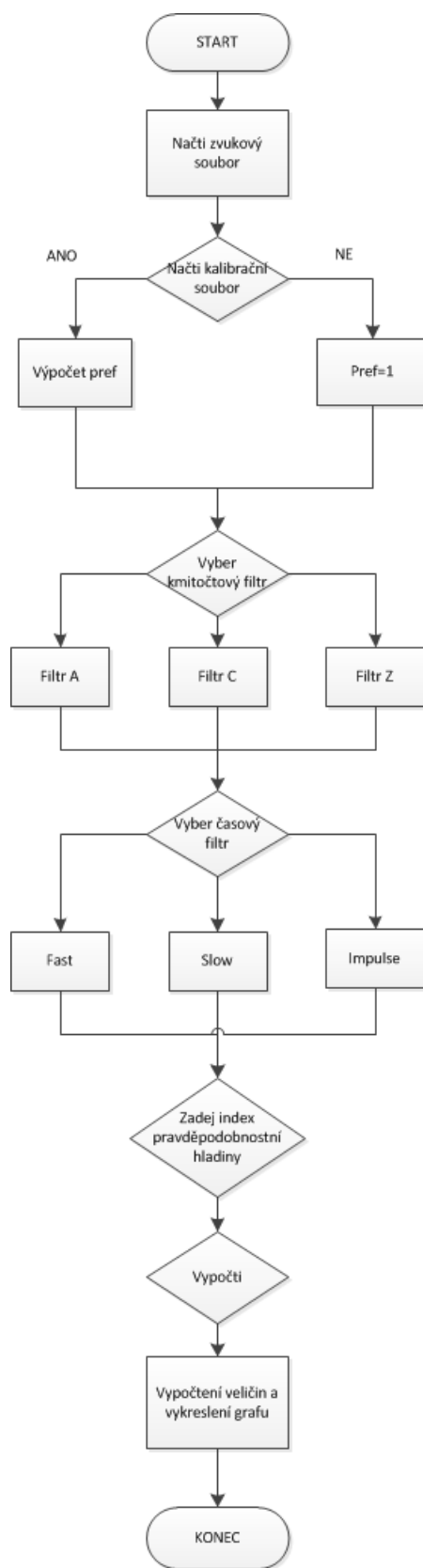


Obr. 3.3: Grafické rozhraní aplikace

Pro správný běh aplikace je třeba dodržet následující postup (viz také vývojový diagram 3.4): nejprve stiskem tlačítka „Nacti soubor“ otevřeme dialogové okno pro načtení zvukového souboru ve formátu *.wav. Tento soubor je pak navzorkován vzorkovací frekvencí 48 kHz a hodnoty vzorkovaného signálu jsou uloženy do vektoru \mathbf{x} , který uložíme do položky UserData daného grafického objektu. Položka UserData slouží v grafickém prostředí MATLABu k přenosu dat mezi funkcemi nebo jejich částmi [5].

Dále stiskem tlačítka „Nacti kalibrační soubor“ načteme kalibrační soubor, ze kterého se vypočítá kalibrační konstanta (viz popis funkce `calibration.m`), která je pro další výpočet uložena do proměnné `x1` a pak do položky UserData daného tlačítka, ze které ji pak při výpočtu dalších veličin budeme volat. Pokud není načten kalibrační soubor, je hodnota kalibrační konstanty nastavena na 1. Do editačního pole označeného „zadej index hladiny“ je pak třeba zadat index (v rozmezí 0-100) hledané pravděpodobnostní hladiny. Posledním krokem před spuštěním výpočtu je pak výběr kmitočtového a časového filtru, které budeme aplikovat na měřený signál.

Stiskem tlačítka „Vypočti“ pak spustíme výpočet jednotlivých statistických veličin a vykreslení časového průběhu měřeného signálu před a po kmitočtové a časové filtraci. Hodnoty navzorkovaného signálu, které byly před spuštěním výpočtu uloženy do proměnné \mathbf{x} , jsou pak vynásobeny kalibrační konstantou, prochází časovým a kmitočtovým filtrem a jsou z nich postupně vypočítány ekvivalentní hladina akustického tlaku, hluková expozice, maximum a minimum a pravděpodobnostní hladina (podrobný popis funkcí pro výpočet jednotlivých veličin viz předchozí podkapitoly). Nakonec je vykreslen časový průběh filtrovaného signálu.



Obr. 3.4: Vývojový diagram aplikace

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Aplikace byla otestována na zvukové nahrávce `pokus.wav`. Pro stejný soubor byly naměřeny hodnoty akustických hladin pomocí audio a akustického analyzátoru XL2 od firmy NTI Audio, který je vybaven integrovaným digitálním hlukoměrem a umožňuje ukládat výstupní data měření („report“) do textových souborů ve formátu ASCII. Nahrávku a výsledky měření hlukoměrem XL2 poskytl vedoucí této práce. Pro všechny naměřené hodnoty byla vypočítána absolutní a relativní chyba měření. Výsledky a chyby měření byly zpracovány do tabulky 4.1. Porovnány byly zejména hodnoty maximální, minimální a ekvivalentní hladiny akustického tlaku za použití různé kombinace váhových filtrů (A, C nebo Z) a časové konstanty (Fast, Slow nebo Impulse) a pravděpodobnostní hladiny (s indexem 10, 50 a 90) akustického tlaku s použitím váhového filtru A a konstanty Fast.

hladina	XL2 NTI [dB]	aplikace [dB]	absolutní chyba [dB]	relativní chyba [%]
LASmax	67,3	58,3	9	13,4
LASmin	51,1	51,2	0,1	0,2
LAFmax	71,3	62,4	8,9	12,5
LAFmin	39,1	45,7	6,6	16,9
LAImax	75,6	66,6	9	11,9
LAImin	64,7	60	4,7	7,3
LZSmax	76,4	69,6	6,8	8,9
LZSmin	63,7	65	1,3	2,0
LZFmax	79,8	73	6,8	8,5
LZFmin	50,5	60,5	10	19,8
LZImax	84	76,6	7,4	8,8
LZImin	75,9	72,6	3,3	4,3
LAIeq	71,9	64	7,9	11
LCIeq	80,8	74,6	6,2	7,7
LZIeq	81,1	75	6,1	7,5
LAF10%	67,3	59,2	8,1	12,0
LAF50%	63	54,8	8,2	13,0
LAF90%	59,2	51	8,2	13,9

Tab. 4.1: Srovnání výsledků měření aplikací v MATLABu a digitálním hlukoměrem XL2 NTI

Absolutní chybu měření jsme počítali jako rozdíl mezi hodnotou naměřenou aplikací v MATLABu a hlukoměrem XL2 NTI. Relativní chybu pak jako poměr absolutní chyby k hodnotě naměřené hlukoměrem XL2 NTI. Průměrná naměřená absolutní chyba činí 6,6 dB, průměrná relativní chyba pak 10%. K objektivnímu zhodnocení přesnosti měření by bylo vhodné provést srovnání na více zvukových souborech, i z tohoto jednoho měření je patrné, že vytvořená aplikace poskytuje pouze přibližné hodnoty akustických hladin a bylo by třeba ji dále optimalizovat.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce byla realizace funkcí v prostředí MATLAB, které se zvukovými soubory ve formátu wav provedou váhování v čase a v kmitočtu a statistickou analýzu měření. V programovacím prostředí MATLAB byla vytvořena aplikace s jednoduchým grafickým rozhraním, která umožňuje načtení souboru, kalibraci hladiny, výpočet základních statistických veličin a grafické zobrazení časového průběhu filtrovaného signálu. Aplikace byla otestována na reálných datech a výsledky měření byly srovnány s hodnotami naměřenými digitálním hlukoměrem XL2 NTI. Vzhledem k tomu, že průměrná relativní odchylka měření je 10%, je aplikace vhodná spíše jen pro orientační odhad hodnoty měřených veličin a některé části kódu by bylo třeba dále optimalizovat.

LITERATURA

- [1] BERAN, V. *Chvění a hluk*. 1. vyd. v Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 202 s. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [2] COUVREUR, Ch. *Octave* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69-octave>>[cit. 20. 05. 2015].
- [3] ČSN EN 61672-1: *Elektroakustika – Zvukoměry – Část 1: Technické požadavky*. Česká technická norma, Český normalizační institut, listopad 2003.
- [4] ČSN EN 61260: *Elektroakustika - Oktávové a zlomkooktávové filtry*. Česká technická norma, Český normalizační institut, červenec 1997.
- [5] DOŇAR, B., ZAPLATÍLEK, K. *Matlab: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vydání. Praha: Ben – technická literatura, 2004. 216 s. ISBN 978-80-7300-133-9.
- [6] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Brno: VUT Brno, 2012, 167 s. ISBN: 978-80-214-4450-8.
- [7] SMÉKAL, Z. *Analýza signálů a soustav*. Brno: VUT Brno, 2012, 251 s. ISBN: 978-80-214-4453-9.
- [8] SMETANA, C. a kol. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Sdělovací technika, Praha 1998. ISBN: 80-901936-2-5.
- [9] VAŠINA, M. a kol. *Environmentální fyzika - studijní texty*. Zlín: UTB, 2010 [online]. Dostupné z URL: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika>[cit. 17. 02. 2015].

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah elektronické přílohy	36
A.1	Seznam přiložených souborů	36

A OBSAH ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

A.1 Seznam přiložených souborů

Elektronická příloha obsahuje:

- elektronickou verzi bakalářské práce ve formátu PDF
- zdrojové kódy aplikace v programu MATLAB
- zvukové soubory ve formátu WAV, na kterých byla aplikace otestována